

文章编号 1004-924X(2011)12-2891-09

应力传感光缆的应力传递特性

张旭苹*, 高 岑, 王 峰, 李存磊

(南京大学 光通信工程研究中心, 江苏 南京 210093)

摘要: 光纤应力传感系统通常采用传感光缆代替裸光纤作敏感元件, 因此研究传感光缆应力传递性能很有必要。本文从弹性力学的角度, 利用拉梅公式和广义胡克定律相结合的方法, 为紧缚型传感光缆和加强型传感光缆建立了应力传递理论模型, 推导出光缆的应变与它受到的应力之间的关系。分别对紧缚型和加强型传感光缆的样品进行了应力实验, 利用布里渊光学时域反射仪(BOTDR)测量了光缆的应变。结果显示, 理论计算和实验测量的趋势一致, 线性度均超过了 97%, 斜率之间的差别小于 8%, 从而证明了理论模型的有效性。该模型可为光纤应力传感系统判定被测对象受力状况提供直接依据。

关键词: 光纤传感器; 光缆应力传递模型; 弹性力学

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111912.2891

Stress transfer performance of strain sensing cable

ZHANG Xu-ping*, GAO Cen, WANG Feng, LI Cun-lei

(Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

* Corresponding author, E-mail: xpzhang@nju.edu.cn

Abstract: In a fiber strain sensing system, strain sensing cable is usually used as a sensing element instead of bare fiber. Therefore, it is necessary to explore the high stress transfer performance of a strain sensing cable. Combining Lamé formula and generalized Hooke's law, this paper establishes theoretical models for a tight-jacketed sensing cable and a reinforced sensing cable based on elasticity mechanics and deduces the relationship between the strain of the cable and its stress. Then it does the simulation and experiment on samples of these two typical types of sensing cables by using Brillouin Optical Time-domain Reflectometer(BOTDR) to detect the strain of the cables. The results of theoretical calculation and the experimental measurement show that the linear rates of all the results are more than 97%, and the differences of the slope between the theoretical calculation and the experimental measurement are less than 8%, which proves the models to be effective. The models can provide a basis for stress sensing systems in determining the stress situation for an objective.

Key words: optical fiber sensor; stress transfer model of sensing cable; elasticity mechanics

收稿日期: 2011-04-19; 修订日期: 2011-05-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61027017, 60644001); 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2010CB327803)

1 引言

与传统的传感方法相比,光纤传感有诸多优点,如传感距离长、传感灵敏度高、速度快、定位精度高、可实现分布式传感、抗电磁干扰等^[1],因此得到了越来越多的关注,其应用领域也越来越广泛^[2-4]。

在光纤应力传感系统中,为保护光纤,增加其强度,通常使用传感光缆作为敏感元件,而不使用裸光纤。但是,由于力在从光缆外护套到内部光纤的层层传递过程中被削弱,影响了传感光缆的灵敏度;并且,由于光纤传感系统所测量的是光纤的应变,对于不同类型的光缆,即使测得的应变值相同,光缆受到的应力也不一定相同,即测量到的应变值并不能直接反映光缆实际受到的应力。而在光纤应力传感的应用中,光缆实际受到的应力才能更直接地反映被测对象的受力状况,因此需要研究光缆的应力传递特性,建立光缆应变和应力之间的对应关系,这样不仅可以由光缆受到的应力计算光纤的应变,而且能通过测量光纤的应变,推算出光缆实际受到的应力,从而可以更加真实地掌握被测对象的受力情况。

目前,关于光缆应力特性的研究,多围绕通信光缆展开,比如自承式光缆的应力分析^[5]、海底光缆的应力分析^[6]等等,还未发现针对传感光缆传递响应特性的研究。而通信光缆和传感光缆两者用途的不同,决定了它们所关注的重点也不相同,通信光缆为保证通信质量,要尽量减小外部作用力向内的传递;传感光缆为提高传感效果,要尽可能多地将外部作用力传递到内部光纤,各个部件之间不能有相对位移。本文旨在通过理论分析,建立应力传感光缆的应力传递模型,用以计算光缆的应变与应力的关系。在实际应用中,可以利用该模型为光纤传感系统在判定各种事件时提供更加直接的依据,也可以在设计传感系统时计算备选传感光缆的灵敏度,进一步地为各种不同应用场合中传感光缆的选型提供参考。同时,本文利用 BOTDR 技术^[7-8]来测量外力作用下光缆的实际应变数据,与理论计算值进行对比以检验模型的有效性。

2 光缆应力传递模型

目前的传感光缆有两种典型的结构:紧缚型和加强型,它们的基本结构如图 1、2 所示。由于两种光缆的结构存在一定的差异,本文将分别对它们进行分析,建立应变与应力之间的关系。

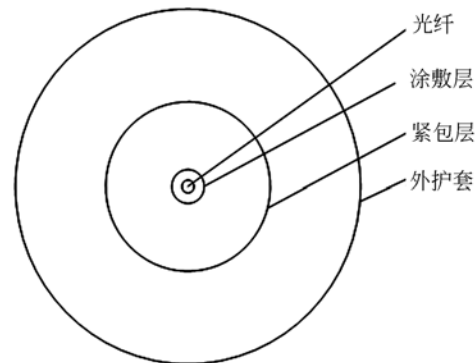


图 1 紧缚型光缆的基本结构

Fig. 1 Basic structure of tight-jacketed fiber cable

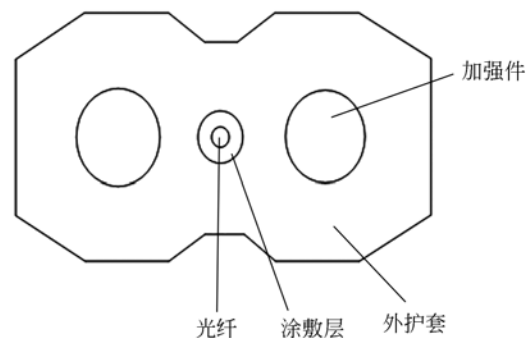


图 2 加强型光缆基本结构

Fig. 2 Basic structure of reinforced fiber cable

2.1 紧缚型光缆的应力传递模型

紧缚型光缆的横截面是一个多层圆环结构,如图 1 所示,从内到外分别是光纤、涂敷层、紧包层和外护套。这种类型的光缆可以用一个多层圆柱形模型来计算应力(单位面积上的作用力,单位为 Pa)产生的应变。

根据弹性力学中的广义胡克定律,光缆的各向应变为^[9]:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)], \quad (1)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)], \quad (2)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_\theta + \sigma_r)], \quad (3)$$

其中, E 是弹性模量, ν 是泊松比, $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z$ 和 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ 分别是光缆径向、环向和轴向的应变和应力。

根据拉梅公式有^[10]:

$$\sigma_r = \frac{p_i a^2 - p_e b^2}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2 (p_e - p_i)}{(b^2 - a^2) r^2}, \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_i a^2 - p_e b^2}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2 (p_e - p_i)}{(b^2 - a^2) r^2}, \quad (5)$$

其中, a 和 b 分别表示内外半径, p_i 和 p_e 分别表示内外压强。

将拉梅公式代入式(3)中,可以得到半径不同时轴向应变的表达式:

$$\epsilon_z = \frac{1}{E_0} (\sigma_z + 2\nu_0 p_1), \quad r \leq r_0, \quad (6)$$

$$s = -\nu \frac{1}{E_3} (\sigma_z + \frac{2\nu_3 (p_3 r_2^2 - p_4 r_3^2)}{r_3^2 - r_2^2}) r + \frac{1+\nu}{E(1-\xi^2)} [(1-2\nu)(p_i \xi^2 - p_e) r - a^2 \frac{(p_e - p_i)}{r}], \quad (9)$$

根据式(9),得到在每两层的交界处对应的径向位移:

$$s_{01} = -\nu_0 \frac{1}{E_3} (\sigma_3 + \frac{2\nu_3 (p_3 r_2^2 - p_4 r_3^2)}{r_3^2 - r_2^2}) r_0 - \frac{p_1 r_0}{E_0} - (1+\nu_0)(1-2\nu_0), \quad (10)$$

$$s_{kk} = -\nu_k \frac{1}{E_3} (\sigma_3 + \frac{2\nu_3 (p_3 r_2^2 - p_4 r_3^2)}{r_3^2 - r_2^2}) r_{k-1} + \frac{(1+\nu_k) r_{k-1}}{E_k(1-\xi_k^2)} [(1-2\nu_k \xi_k^2 + \xi_k^2) p_k - 2(1-\nu_k) p_{k+1}], \quad (k=1, 2, 3), \quad (11)$$

$$s_{kk+1} = -\nu_k \frac{1}{E_3} (\sigma_3 + \frac{2\nu_3 (p_3 r_2^2 - p_4 r_3^2)}{r_3^2 - r_2^2}) r_k + \frac{(1+\nu_k) r_k}{E_k(1-\xi_k^2)} [2(1-\nu_k) \xi_k^2 p_k - (1-2\nu_k + \xi_k^2) p_{k+1}], \quad (k=1, 2), \quad (12)$$

其中, $s_{01}, s_{11}, s_{12}, s_{22}, s_{23}, s_{33}$ 分别表示光纤包层外层、涂敷层内层、涂敷层外层、紧包层内层、紧包层外层、外护套内层的径向位移。

根据径向位移的连续性,在两层边界的径向位移是相等的,有: $s_{01} = s_{11}, s_{12} = s_{22}, s_{23} = s_{33}$ 。将这 3 个等式联立,并把实际作用于光缆的应力代入,可以解出 p_1, p_2, p_3 的大小。将 p_1, p_2, p_3 以及光缆各参数代入式(7)中,就可以得到光缆的应变。

2.2 加强型光缆的应力传递模型

如图 2 所示,加强型光缆结构的护套还嵌有 FRP(Fiber Reinforced Plastics, 玻璃纤维增强塑料)加强件,它的横截面是一个非圆中心对称图形,因此外护套对内部光纤涂敷层的压强是非均匀分布的。另外,FRP 加强件的弹性模量很高,

$$\epsilon_z = \frac{1}{E_k} (\sigma_z + \frac{2\nu_k (p_k r_{k-1}^2 - p_{k+1} r_k^2)}{r_k^2 - r_{k-1}^2}), \quad r_{k-1} \leq r \leq r_k$$

$$(k=1, 2, 3), \quad (7)$$

其中, E_0, E_1, E_2, E_3 和 $\nu_0, \nu_1, \nu_2, \nu_3$ 分别表示内部光纤、涂敷层、紧包层、外护套的弹性模量和泊松比; p_1, p_2, p_3 分别表示光纤和涂敷层、涂敷层和紧包层、紧包层和外护套之间的压强, p_4 表示外部压强。

式(6)和式(7)中, p_1, p_2, p_3 是未知量,只要求得这 3 个量就能解出光缆的轴向应变。根据式(2)和(3)可以推导出光缆在半径为 r 处的径向位移:

$$s = -\nu \epsilon_z r + \frac{1-\nu^2}{E} \left[\sigma_\theta - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_r \right] r. \quad (8)$$

令 $\xi = a/b$,表示内外径比,式(8)结合拉梅公式和式(3),得到半径 r 处的径向位移^[11]:

必须考虑到它对光缆整体弹性模量的影响。可以将加强型光缆分为 3 部分,以 FRP 为中心的左右两个加强部分和以光纤为中心的中间部分。由于加强部分由两种材料组成,所以要先确定加强部分的等效弹性模量,然后再结合中间部分推导光

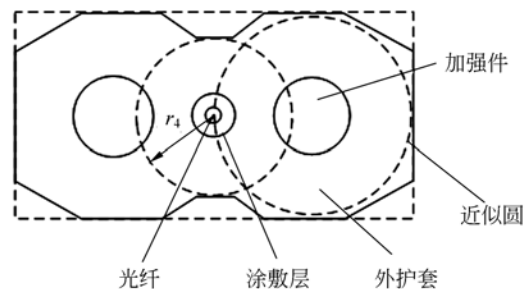


图 3 加强型光缆的近似处理

Fig. 3 Approximation of reinforced fiber cable

缆应变和应力的关系。

加强部分是一个多边形结构,本文采用它的内切圆柱形来近似处理,如图 3 中近似虚圆所示,因此,可以根据式(7)得到等效弹性模量 E_e 的表达式:

$$E_e = \frac{\sigma_z}{\epsilon_z} = E_1 + \frac{2u_1(p_1 r_0^2 - p r_1^2)}{\epsilon_z(r_1^2 - r_0^2)}, \quad (13)$$

其中, p 为外部压强,此处 $p=0$, p_1 为两种材料之间的压强,由 $s_{01} = s_{11}$, 得到 p_1 为:

$$p_1 = \frac{\epsilon_z(u_1 - u_0)}{\frac{r_0}{E_0}(1+u_0)(1-2u_0) + \frac{r_1}{E_1}(1+u_1)(1-2u_1\xi^2 + \xi^2)} \quad (14)$$

光缆横截面可以近似为一个矩形,则等效后的加强部分对光纤的作用力是一个非均匀载荷,这个载荷中最大和最小的应力为 σ_1 和 σ_2 。根据圣维南原理,当图 3.3 中的 r_4 足够大时,该圆周上任意一点在直角坐标系中的应力状态为 $\sigma_x = -\sigma_1, \sigma_y = -\sigma_2, \tau_{xy} = 0$ ^[12]。将其变换到极坐标中,可以得到:

$$\sigma_r = -(\sigma_1 + \sigma_2) - (\sigma_1 - \sigma_2)\cos(2\theta), \quad (15)$$

$$\sigma_\theta = (\sigma_1 + \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_2)\cos(2\theta), \quad (16)$$

$$\tau_{r\theta} = (\sigma_1 - \sigma_2)\sin(2\theta). \quad (17)$$

令: $q_1 = \sigma_1 + \sigma_2, q_2 = \sigma_1 - \sigma_2, q(\theta) = -\sigma_r, T(\theta) = \tau_{r\theta}$, 可以得到^[13]:

$$q(\theta) = q_1 + q_2 \cos(2\theta), \quad (18)$$

$$T(\theta) = q_2 \sin(2\theta), \quad (19)$$

其中, $q(\theta)$ 为径向载荷,它包括均匀外载 q_1 和非均匀外载 $q_2 \cos(2\theta)$, $T(\theta)$ 是非均匀环向作用力,大小为 $q_2 \sin(2\theta)$ 。载荷的模型如图 4 所示。

$q(\theta)$ 和 $T(\theta)$ 的求解过程可以参照文献[12]。由于这两个作用力都是与角度有关的量,因此

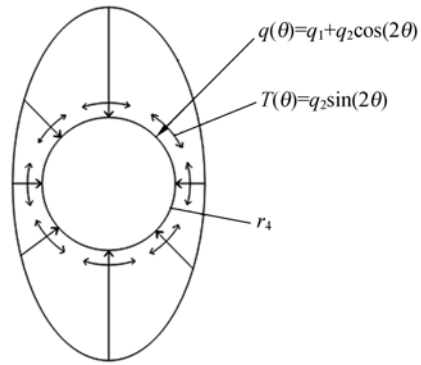


图 4 r_4 处承受非均匀载荷示意图
Fig. 4 Schematic diagram of nonuniform load at r_4

在解得 $q(\theta)$ 和 $T(\theta)$ 后,需要先求出这两个力的等效作用效果,再将得到的等效作用力作为外部压强,代入到以 r_4 为最外层的两层紧缚型模型中,求解出光纤的应变。

2.3 光缆应变值的理论计算

本文选取了 3 条传感光缆样品,样品的基本信息如表 1 所示:

表 1 样品光缆的基本信息

Tab.1 Basic information of sample cables

光缆编号	光纤类型	外护套材料	结构类型
1	单模	聚氨酯 低烟无卤材料	紧缚型,无加强件
2	单模	(LSZH, Low Smoke Zero Halogen)	两根 FRP 加强件
3	单模	低烟无卤材料	两根 FRP 加强件

各条光缆各个部件所用到的材料的力学参数如表 2 所示^[9,14-15]:

表 2 各条光缆的弹性力学参数

Tab.2 Elasticity parameters of each cable

光缆 编号	r_0 / μm	r_1 / μm	r_2 / μm	r_3 (r_{FRP}) / μm	E_0 / GPa	E_1 / MPa	E_2 / GPa	E_3 (E_{FRP}) / GPa	u_0	u_1	u_2	u_3 (u_{FRP})
1	62.5	125	545	1055	72.5	10	0.3	0.3	0.17	0.495	0.252	0.252
2	62.5	125	880	(215)	72.5	10	3.6	(105)	0.17	0.495	0.38	(0.327)
3	62.5	125	1110	(210)	72.5	10	3.6	(105)	0.17	0.495	0.38	(0.327)

将 1 号光缆材料的弹性力学参数以及它受到的应力代入 $s_{01} = s_{11}, s_{12} = s_{22}, s_{23} = s_{33}$ 以及式(7)

中,得到相应的应变值如图 5 所示。

将 2 号、3 号光缆的弹性力学参数代入式

(13)、(14)中,计算出加强部分的等效弹性模量,再选取 $r_1 = r_2$,解得 2 号、3 号光缆的 q_1, q_2 值如表 3 所示。

表 3 2、3 号光缆不同应力下 q_1, q_2 的计算值
Tab. 3 Calculated q_1 and q_2 of cable No. 2 and No. 3 under different stresses

应力 /MPa	2 号光缆		应力 /MPa	3 号光缆	
	q_1 /kPa	q_2 /kPa		q_1 /kPa	q_2 /kPa
0.8220	5.016	0.375	1.094	6.679	0.545
2.572	15.68	1.175	2.736	16.70	1.363
3.033	18.49	1.385	3.303	20.16	1.646
3.744	22.83	1.710	3.911	23.86	1.949

从表 3 中可以看出, q_1 和 q_2 相差了 10 倍以上,在这个非均匀的载荷中, q_1 占绝对主导地位,因此,直接将 q_1 作为涂敷层的外部压强代入紧缚型模型中,计算光缆的应变值,结果如图 5 所示。

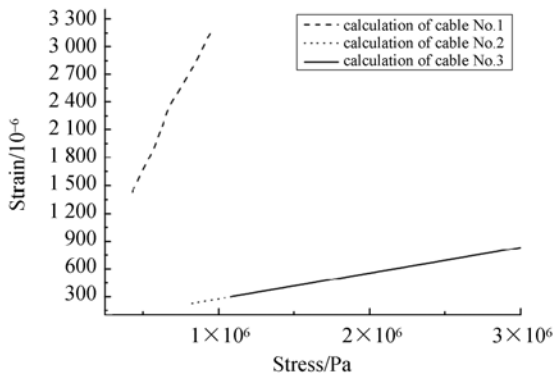


图 5 各条光缆应变的理论计算值
Fig. 5 Strain calculation of each cable

从图 5 中可见,2 号、3 号光缆的应变值非常接近,1 号光缆的应变值远大于 2 号和 3 号光缆。

将聚氨酯材料和低烟无卤材料的弹性力学参数分别代入相同的光缆模型中,计算同样应力下的应变值,结果如图 6 所示。

将聚氨酯材料和低烟无卤材料的弹性力学参数分别代入到光缆截面积相等的加强型光缆和紧缚型光缆的模型中,分别计算同样应力下,同种材料在两种结构中的应变值,结果如图 7 所示。

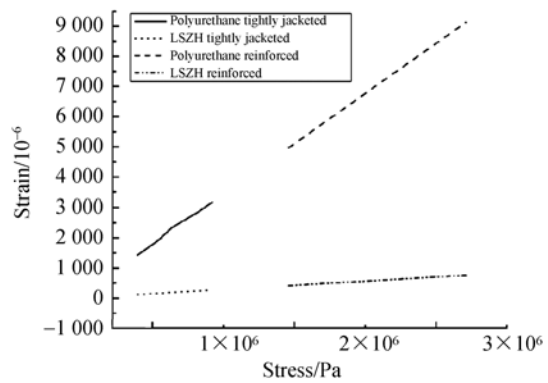


图 6 结构相同护套材料不同的光缆的应变值
Fig. 6 Strain of cables with the same structure but different jacket materials

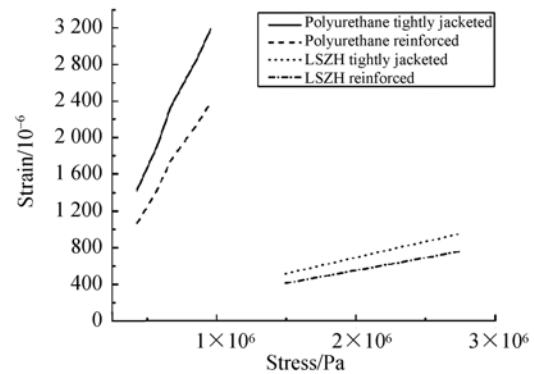


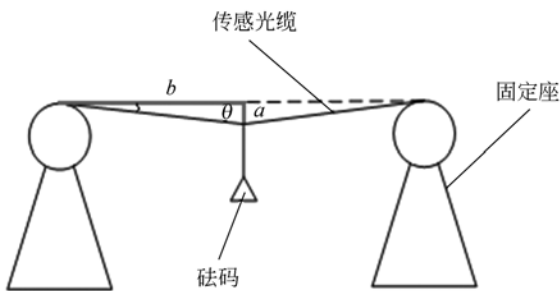
图 7 护套材料相同结构不同的光缆的应变值
Fig. 7 Strain of cables with same jacket material but different structures

3 光缆应力响应实验

实验中,采用沿着光缆径向施力的方式来模拟光缆的受力情况,如图 8 所示。将光缆受力段悬空(约 1.2 m),两端固定在固定座上,把砝码悬挂在受力段,以一个固定的重量为一个步长,逐次增加砝码的重量,利用 BOTDR 技术,使用光纤应力分析仪 AQ8603 来测量光纤的应变,AQ8603 的应变测量精度为 3×10^{-5} ,最大测量距离为 80 km,满足本实验的精度要求。

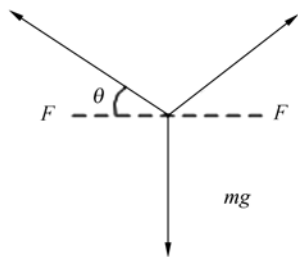
这种实验方法,主要测试光缆受到径向作用力时产生的轴向应变。从图 8(b)中可以看出,砝码沿光缆径向施力,作用点左右两段光缆的轴向作用力的合力等于砝码的重力,即 $mg = 2 \times F \times$

$\sin(\theta)$, θ 是光缆与水平方向的夹角, 测量出这个夹角即可计算轴向作用力 F 。通过以下方法获得 θ 的大小: 首先测量砝码悬挂点到光缆固定位置的垂直高度 a , θ 角的正切值 $\tan \theta = a/b$, 利用反正切函数计算 θ 的大小。测量 a 和 b 使用的工具为直尺, 直尺的测量精度为 1 mm, 某次测量中 $b = 610$ mm, $a = 30$ mm, 1 mm 的测量误差带来的角度误差为 0.09° , 是角度计算值的 3.3%, 因此这个角度的测量精度也能够满足本实验的要求。



(a) 径向作用力示意图

(a) Schematic diagram of radial force



(b) 光缆受力分析图

(b) Stress analysis of cable

图 8 光缆应力实验原理图

Fig. 8 Schematic diagram of stress response experiment on sensing cables

实验时, 由于光缆的材料结构不同, 它们可以承受的作用力范围也不一样, 1 号光缆为紧缚型的光缆, 外护套相对较软, 延展能力较强, 可以承受的力相对较小, 2 号、3 号 2 根光缆都含有 FRP 加强件, 外护套较硬, 延展能力稍弱, 可以承受的力较大, 同样的作用力引起的形变也小于紧缚型光缆。因此, 1 号光缆以 10 g 砝码为步长增

加重量, 2 号、3 号光缆以 20 g 砝码为步长增加重量。

各条光缆在不同应力下的应变实验测量值如图 9 所示, 应变测量值的线性度和斜率如表 4 所示。从图中可以看出, 2 号、3 号光缆的应变值非常接近, 1 号光缆的应变值大于 2 号和 3 号光缆。从表 4 的数据中也可以看出, 1 号光缆应变测量值的斜率是 2 号和 3 号光缆的斜率的 10 倍左右, 证明 1 号光缆的灵敏度远高于 2 号和 3 号光缆。

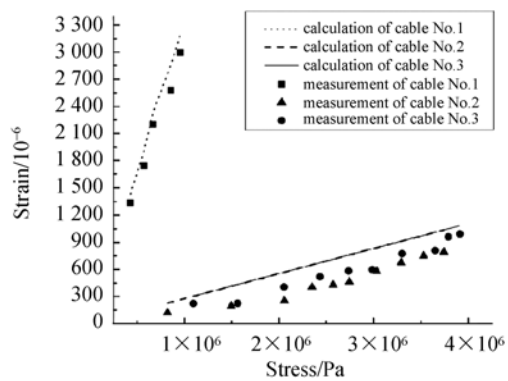


图 9 各条光缆应变的理论计算值和实验测量值

Fig. 9 Strain calculation and measurement of the cables

表 4 计算值和测量值的线性度以及斜率

Tab. 4 Linear rate and slope of calculation and measurement

光缆 编号	线性度		斜率		
	计算值%	测量值%	计算值	测量值	偏差%
1	99.782	99.967	44.656	41.53	7.00
2	97.8	99.386	4.112	3.815	7.22
3	98.725	98.911	4.354	4.511	3.61

图 9 同时给出了各条光缆应变的理论计算值, 从中可以看出, 计算值与测量值基本吻合, 变化趋势一致。表 4 中给出了计算值的线性度和斜率, 由此可知, 计算值和测量值的线性度都很好, 超过了 97%, 每条光缆计算值和测量值之间斜率的差异在 5% 左右。但由于计算时使用的光缆参数均为标准值, 而厂商生产光缆时, 由于工艺、采用原材料的批次和产地等因素的影响, 材料参数

与标准值之间存在着偏差,同时,光缆材料在使用过程中可能会出现不同程度的老化,特征参数也会有一定的改变,因此这些因素会导致理论计算值与实际测量值之间出现一些差异。

4 光缆应力响应性能分析

从图 6 中可以看出,相同应力下,采用聚氨酯材料光缆的应变值要大于采用低烟无卤材料光缆的应变值。造成这种差异的主要原因是光纤成缆之后,其直径为几个毫米,是光纤涂敷层直径的十几倍,导致在相同作用力下的应力变为原来的几分之一。如果光缆材料的弹性模量和光纤的弹性模量相同,产生的应变也将是原来的几分之一,大大降低了光缆的应力响应性能;如果采用弹性模量较低的材料来成缆,可以降低光缆整体的等效弹性模量,在一定程度上抵消半径增加对应变带来的影响,保证了光缆的灵敏度。

从图 7 可以看出,相同应力下,紧缚型结构光缆的应变值要大于加强型结构光缆的应变值。造成这种差异的主要原因是,加强型结构光缆中带有 FRP 加强部件,它的弹性模量是聚氨酯材料的几百倍,延展性低,它的存在提高了加强型光缆外护套的等效弹性模量,降低了光缆的灵敏度,而紧缚型结构的光缆则没有可以提高等效弹性模量的

因素。

综上所述,在需要测量的应力较小的应用场合中,采用较低弹性模量的护套材料以及紧缚型结构的传感光缆传感效果更好。

5 结 论

本文利用拉梅公式和广义胡克定律,为紧缚型和加强型应力传感光缆建立了数学模型。推导了这两种光缆应变与应力的关系,并进行了应力传感光缆的应力响应实验,实验测量值和理论值具有一致的趋势,线性度超过了 97%,斜率的偏差小于 8%,证明了该模型正确反映了传感光缆的应力传递特性。同时,本文在光缆力学模型的基础上分析了光缆材料和结构对应力传感效果的影响。

利用本文的模型,可以为光纤应力传感系统在判定被测对象受力状况时,提供更加直接的依据。在进一步的研究中,可以将光缆受到的应力按照大小划分为不同的等级,并利用本文建立的模型,计算在特定应力范围内既可以有效传感,又具有最好的传感效果的光缆,为系统设计者在传感光缆的选型中提供参考。

参考文献:

- [1] 张旭苹,王峰,路元刚. 基于布里渊效应的连续分布式光纤传感技术[J]. 激光与光电子学进展, 2009(11):14-20.
ZHANG X P, WANG F, LU Y G. Fully distributed optical fiber sensor based on Brillouin effect[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009(11):14-20. (in Chinese)
- [2] 杨兴华,彭利荣,滕平平,等. 溶胶-凝胶薄膜修饰的微结构聚合物光纤氟离子传感探头[J]. 光学精密工程, 2010,18(1):84-87.
YANG X H, PENG L R, TENG P P, et al.. Fluor-

- ide sensitive optical probe of microstructured polymer optical fiber modified with sol-gel thin film[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):84-87. (in Chinese)
- [3] 胡新宁,王秋良,崔春艳,等. 光纤传感测量系统在超导转子旋转装置中的应用[J]. 光学精密工程, 2008,16(11):2092-2097.
HU X N, WANG Q L, CUI CH Y, et al.. Application of fiber optic sensor measurement system to spinning superconducting rotor instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2092-2097. (in Chinese)
- [4] 王宏亮,宋娟,冯德全,等. 应用于特殊环境的光纤

- 光栅温度压力传感器[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(3):545-551.
- WANG H L, SONG J, FENG D Q, *et al.*. High temperature-pressure FBG sensor applied to special environment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3):545-551. (in Chinese)
- [5] 黄俊华. ADSS 光缆的机械特性[J]. 电力系统通信, 2001(3):12-18.
- HUANG J H. Mechanical features of ADSS cable [J]. *Telecommunications for Electric Power System*, 2001(3):12-18. (in Chinese)
- [6] 李兢. 海底光缆力学特性有限元分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- LI J. *Finite element analysis of Mechanical properties of Submarine cable*[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [7] 董玉明, 张旭芊, 路元刚, 等. 布里渊散射光纤传感器的交叉敏感问题[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 197-201.
- DONG Y M, ZHANG X P, LU Y G, *et al.*. Cross sensitivity of Brillouin scattering distributed fiber sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 197-201. (in Chinese)
- [8] 宋牟平, 鲍翀, 裘超, 等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器[J]. 光学学报, 2009, 30(3):650-654.
- SONG M P, BAO CH, QIU CH. *et al.*. A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 30(3):650-654. (in Chinese)
- [9] YANG Y CH. Elasto-optics in double-coated optical fibers induced by axial strain and hydrostatic pressure[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(10): 1989-1995.
- [10] 刘鸿文. 材料力学[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- LIU H W. *Mechanics of Materials*[M]. 4th ed, Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)
- [11] 李军, 李贵川, 陈勉, 等. 双层组合套管设计计算中径向位移公式的确定[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(4):517-518.
- LI J, LI G CH, CHEN M, *et al.*. Determination of radial displacement equation for calculation of dual casing design[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2005, 27(4):517-518. (in Chinese)
- [12] 房军, 赵怀文, 岳伯谦, 等. 非均匀地应力作用下套管与水泥环的受力分析[J]. 石油大学学报, 1995, 19(6):52-57.
- FANG J, ZHAO H W, YUE B Q, *et al.*. Analysis of loading property of casing and cement sheath under non-uniform geologic stress[J]. *Journal of the University of Petroleum*, 1995, 19(6):52-57. (in Chinese)
- [13] 管志川, 赵洪山. 注汽井套管的三轴预应力设计[J]. 工程力学, 2007, 24(4):188-192.
- GUAN ZH CH, ZHAO H SH. Triaxial prestress design of casing in steam injection wells[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(4):188-192. (in Chinese)
- [14] 詹志兰, 陈益人, 狄义华. 聚氨酯涂层织物梯形撕裂性能的研究[C]. 第十五届全国复合材料学术会议论文集, 黑龙江: 中国力学学会, 2009:202-204.
- ZHAN ZH L, CHEN Y R, DI Y H. Study on the trapezoidal tearing behaviours of polyurethane coated fabrics[C]. *Proceedings of the 15th conference on composite materials. Heilongjiang, P. R. China; The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics*, 2009:202-204. (in Chinese)
- [15] 吴寒亮, 王元峰. FRP 约束混凝土圆形柱应力-应变关系的研究[C]. 第六届全国 FRP 学术交流会论文集, 河南: 工业建筑, 2010:241-244.
- YU H L, WANG Y F. Study on stress-strain relationship of circular concrete columns confined with FRP laminates[C]. *Proceedings of the 6th national conference on FRP. Henan, P. R. China; Industrial Construction*, 2010:241-244. (in Chinese)

作者简介:



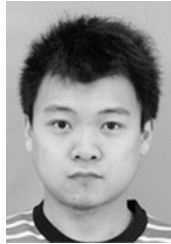
张旭苹(1962—),女,江苏金坛人,博士,教授,博士生导师,1983年、1986年、1995年于东南大学分别获得工学学士、工学硕士、工学博士学位,现任南京大学工程管理学院副院长,南京大学光通信工程研究中心主任,主要从事分布式光纤传感技术、光通信系统关键器件与组件方面的研究。E-mail: xpzhang@nuu.edu.cn



高岑(1985—),男,江苏昆山人,硕士研究生,2008年获得南京大学工学学士学位,主要从事基于布里渊效应的光纤传感网络方面的研究。E-mail: canxin005@163.com



王峰(1981—),男,山西大同人,博士,讲师,2003年、2009年于南京大学分别获得理学学士、工学博士学位,主要从事全分布式光纤传感技术及其在光缆监测中应用等方面的研究。E-mail: hellowangfeng@gmail.com



李存磊(1984—),男,江苏南京人,博士研究生,2006年、2009年于南京大学分别获得工学学士、工学硕士学位,主要从事基于布里渊效应的传感理论方面的研究。E-mail: nick_99_wf@163.com

● 下期预告

基于多点调形原理的旋转曲面连续成形

龚学鹏¹,李明哲²,卢启鹏¹,彭忠琦¹

(1 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033

2 吉林大学 无模成形技术中心,吉林 长春 130022)

为了实现旋转曲面件的高效、柔性成形,对连续多点成形方法进行研究。首先,阐述连续多点成形的原理,并与传统的旋转曲面加工方法相对比,分析其所具备的特点;其次,以盘形件为研究对象,建立有限元模型,分析成形过程中的等效应力和塑性应变场分布;再次,通过模拟结果和主应变状态来分析皱曲现象;最后,研制相应的成形装置,并进行实验研究。结果表明:定心装置和柔性辊作用区的等效应力超过了材料的屈服极限,最大值达到 213 MPa;成形件中心区域塑性应变值最大,达到 0.07,柔性辊作用区塑性应变值次之,达到 0.03;皱曲区域的壳单元产生的是切向压缩变形;实验结果和模拟结果基本相同,都介于 605~615 mm 之间。应力应变场和皱曲的模拟结果与实际情况吻合;成形装置能加工出效果良好的旋转曲面件。